**Palabras clave/** Estrategias bioclimáticas, envolvente del edificio, análisis costo-beneficio, análisis de ciclo de vida.
**Keywords/** Bioclimatic strategies, building envelopes, cost-benefit analysis, life cycle assessment.
**Recepción/** 29 de enero 2025
**Aceptación/** 18 de junio 2025

# Sostenibilidad y rentabilidad en vivienda social: evaluación de una envolvente bioclimática para climas tropicales cálidos

## Sustainability and Profitability in Social Housing: Evaluation of a Bioclimatic Envelope for Warm Tropical Climates

**Hugo Fernando Alegria-Lenis**
Arquitecto, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Máster en Arquitectura y Urbanismo, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Profesor auxiliar, Escuela de Arquitectura, Departamento de Tecnología de la Construcción Universidad del Valle, Cali, Colombia.
hugo.alegria@correounivalle.edu.co

**Walter Giraldo-Castañeda**
Arquitecto, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Magister en Arquitectura y Urbanismo, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
Doctor en Arquitectura, Universidad Nacional de la Plata, la Plata, Argentina.
Profesor y jefe del Departamento de Tecnología de la Construcción, Universidad del Valle, Cali, Colombia.
walter.giraldo@correounivalle.edu.co

**RESUMEN/** Este artículo evalúa la viabilidad ambiental y económica de un prototipo de envolvente bioclimática diseñado para vivienda social en clima cálido tropical seco, con base en un estudio de caso en Cali, Colombia. Se aplicó una metodología integrada que combina el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Análisis Costo-Beneficio (ACB), con el objetivo de cuantificar las emisiones de $CO_2$ equivalente y los costos acumulados de operación y mantenimiento durante un horizonte de 60 años. La evaluación se basó en simulaciones energéticas, el modelo adaptativo de confort térmico (ASHRAE 55) y escenarios climáticos proyectados para 2020, 2050 y 2080. Los resultados muestran que el prototipo evaluado presenta el menor costo acumulado ($16,14 millones COP, aproximadamente USD 4.000) y las menores emisiones estimadas entre las cinco alternativas analizadas. Además, fue la única opción que arrojó un índice costo-beneficio positivo en el largo plazo, alcanzando un valor de 3,05 hacia el año 2080. Esto respalda la utilidad de combinar ACV y ACB como herramienta de análisis integrada para la toma de decisiones en diseño pasivo en vivienda social, especialmente en contextos urbanos vulnerables al cambio climático y con restricciones presupuestarias significativas. **ABSTRACT/** This article assesses the environmental and economic feasibility of a bioclimatic envelope prototype designed for social housing in warm, dry tropical climates. The assessment is based on a case study conducted in Cali, Colombia. An integrated methodology combining Life Cycle Assessment (LCA) and Cost-Benefit Analysis (CBA) was applied to quantify cumulative $CO_2$ equivalent emissions and operation and maintenance costs over a 60-year horizon. The evaluation used energy simulations, the adaptive thermal comfort model (ASHRAE 55), and projected climate scenarios for 2020, 2050, and 2080. The results suggest that the prototype studied proves the lowest cumulative cost (COP $16.14 million, approximately USD $4,000) and the lowest estimated emissions among the five options analyzed. Furthermore, it was the only option that yielded a positive cost-benefit ratio in the long term, reaching a value of 3.05 by 2080. This finding supports the benefits of integrating LCA and CBA as a combined analytical tool for decision-making in passive design for social housing, particularly in urban contexts vulnerable to climate change and subject to significant budgetary constraints.

## INTRODUCCIÓN

El confort térmico y el consumo energético representan desafíos claves en las viviendas sociales ubicadas en climas cálidos ecuatoriales. En Colombia, la materialidad inadecuada de las envolventes en estas edificaciones incrementa la dependencia de sistemas mecánicos de climatización, lo que no solo eleva los costos energéticos, sino también contribuye a la generación de calor antropogénico en áreas urbanas (Medina-Patrón y Escobar-Saiz, 2018; Gamero-Salinas et al., 2020). Según Giraldo C. (2018), este problema se agrava debido a las restricciones económicas tanto de los desarrolladores como de los propietarios, lo que limita la adopción de soluciones constructivas más sostenibles. En este contexto, la implementación de estrategias bioclimáticas pasivas, como la selección de materiales con alta masa térmica, la orientación adecuada y el sombreado, ha demostrado ser efectiva para mejorar el confort térmico y reducir el consumo energético (Chen-Austin, 2022; Barrionuevo, 2019).

Sin embargo, la aplicación de estas estrategias en la vivienda social enfrenta importantes

barreras económicas y técnicas. De acuerdo con Guzmán-Hernández et al. (2019), las decisiones de diseño en este sector suelen priorizar los costos iniciales por encima de los beneficios a largo plazo, limitando así la adopción de enfoques sostenibles. Además, Torres-Quezada y Lituma-Saetama (2023) señalan que herramientas como el análisis costo-beneficio (ACB) y el análisis de ciclo de vida (ACV) son fundamentales para evaluar los impactos económicos y ambientales acumulados de estas estrategias, pero su implementación en contextos tropicales sigue siendo limitada.

Ante esta problemática, la presente investigación propone un enfoque metodológico que combina el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y el Análisis Costo-Beneficio (ACB) como herramientas complementarias para evaluar simultáneamente los impactos ambientales y económicos de una envolvente bioclimática en vivienda social ubicada en clima tropical cálido. Diversos estudios han demostrado la eficacia de estas metodologías cuando se aplican por separado; Paz et al. (2023) destacan el valor del ACV para identificar los impactos ambientales asociados a los materiales y procesos constructivos, mientras que Rodríguez-Potes y Meza-Estrada (2018) subrayan la utilidad del ACB para estimar la rentabilidad de las soluciones pasivas a lo largo del tiempo.

El caso de estudio que sirve como base para esta evaluación fue desarrollado previamente por el autor en el marco de una tesis de maestría (Alegria-Lenis, 2022), en la cual se diseñó y analizó el prototipo mediante simulación energética y modelación térmica. Este artículo retoma dichos insumos con el fin de enfocar el análisis en el valor comparativo de los métodos ACB y ACV como apoyo a la toma de decisiones.

No obstante, su aplicación conjunta sigue siendo escasa en el ámbito de la vivienda social en América Latina. Como advierte Alba-Gómez et al. (2021), aún persiste un vacío investigativo respecto del uso combinado de ambas metodologías en estudios orientados al diseño pasivo. Esta propuesta busca superar tales barreras mediante evidencia cuantitativa que respalde decisiones de diseño replicables, rentables y sostenibles. Con ello, se contribuye al cierre de una brecha metodológica identificada en la literatura y al cumplimiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS 7 y ODS 11) establecidos por la Organización de las Naciones Unidas (https://www.un.org/sustainabledevelopment/es/), al proponer estrategias que disminuyan la demanda energética y fortalezcan la resiliencia habitacional ante al cambio climático.

### Marco conceptual: sostenibilidad, confort térmico y envolventes bioclimáticas

El presente estudio se enmarca en una concepción integrada de sostenibilidad aplicada al entorno construido, entendida como lo señala Artaraz (2002) como el equilibrio entre desempeño ambiental, viabilidad económica y pertinencia social. En este sentido, el análisis se enfoca particularmente en las dimensiones ambiental y económica de la sostenibilidad, evaluadas a través de herramientas de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Análisis Costo-Beneficio (ACB), respectivamente. El uso de estas herramientas permite valorar no solo el impacto ambiental asociado a la producción, operación y mantenimiento de un sistema constructivo, sino también su retorno económico a lo largo del ciclo de vida de la edificación.

El confort térmico, entendido como la satisfacción térmica de los ocupantes respecto de las condiciones del ambiente interior, se aborda bajo el modelo adaptativo propuesto por de Dear y Brager (1998), adoptado por la norma ASHARE 55. Este enfoque considera la capacidad de los usuarios para adaptarse a variaciones térmicas cuando se encuentran en edificios naturalmente ventilados, lo cual es particularmente relevante en contextos de vivienda social en climas tropicales cálidos. La envolvente bioclimática, en este contexto, se define como aquella solución arquitectónica diseñada específicamente para optimizar el comportamiento térmico pasivo de la edificación en función de su clima local, orientación, morfología y uso. Esta se distingue de una solución convencional al integrar criterios de aislamiento térmico, control solar, ventilación y reducción de la demanda energética activa. El prototipo evaluado fue concebido con base en simulaciones, criterios de diseño pasivo y ensayos experimentales, con el fin de ofrecer una solución replicable, económica y ambientalmente viable para entornos urbanos de alta densidad en zonas tropicales.

## METODOLOGÍA

Este estudio adopta un enfoque cuantitativo evaluativo, basado en datos provenientes de la tesis de maestría del autor (Alegria-Lenis,

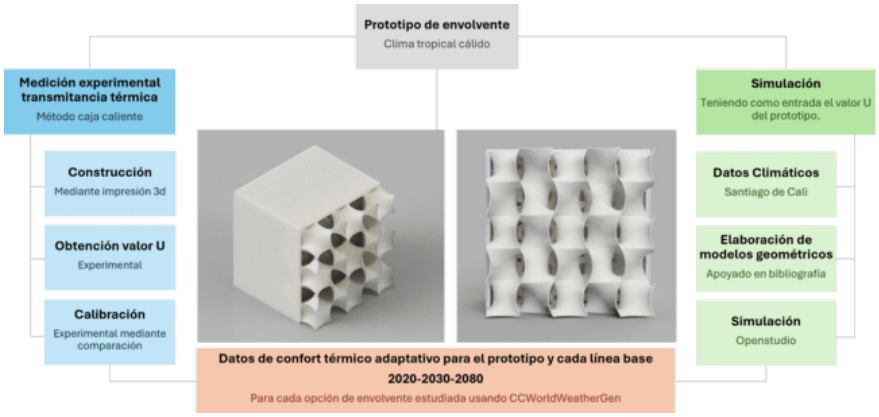



***Figura 1.*** *Esquema del proceso de validación del prototipo bioclimático y simulación energética. Se modeló el confort adaptativo con base en datos climáticos históricos y proyectados (fuente: elaboración propia, 2025).*

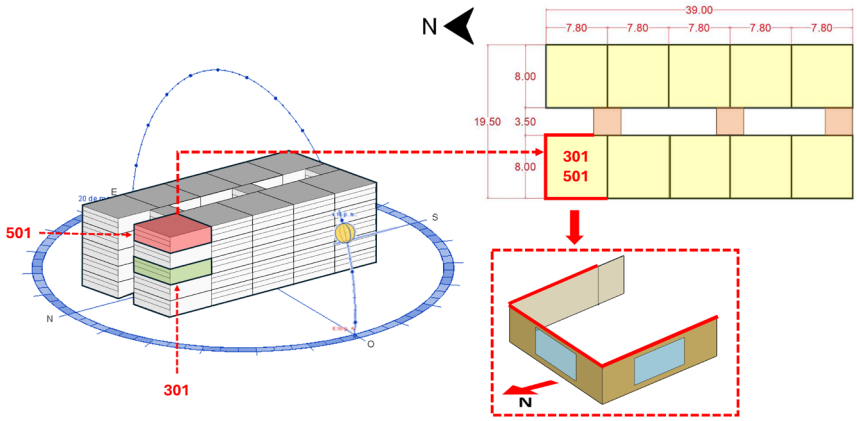



***Figura 2.*** *Modelo geométrico del apartamento tipo de 64 m² según la Resolución 0549 de 2015 (fuente: elaboración propia, 2025).*

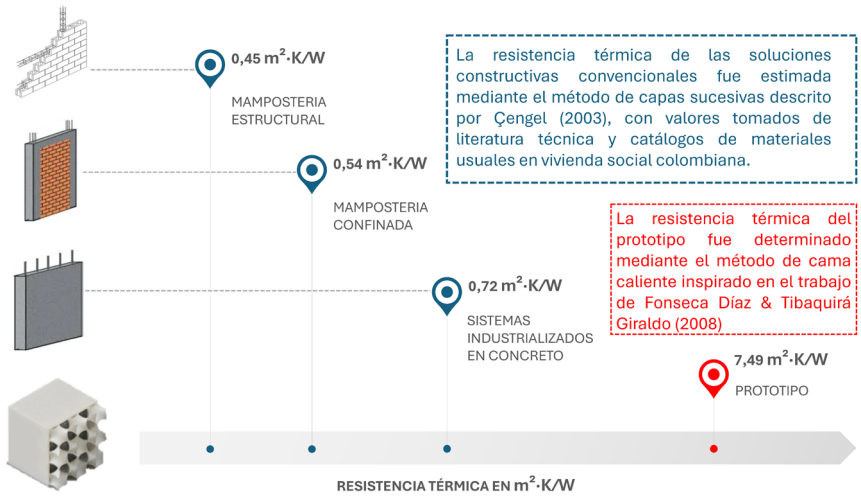



***Figura 3.*** *Comparativa entre las líneas base convencionales y el prototipo propuesto, según valores de resistencia térmica (m²·K/W). Se indica cuáles valores fueron medidos experimentalmente y cuáles provienen de datos técnicos secundarios (fuente: elaboración propia, 2025).*

2022), en la cual se diseñó y simuló un prototipo bioclimático para clima tropical seco, comparándolo con tres soluciones convencionales. A partir de estos insumos, el presente artículo aplica de forma integrada las metodologías Análisis de Ciclo de Vida (ACV) y Análisis Costo-Beneficio (ACB), con el fin de evaluar su pertinencia como herramientas de apoyo en decisiones de diseño pasivo para vivienda social, así como se aprecia en la figura 1.

## Caracterización del caso de estudio

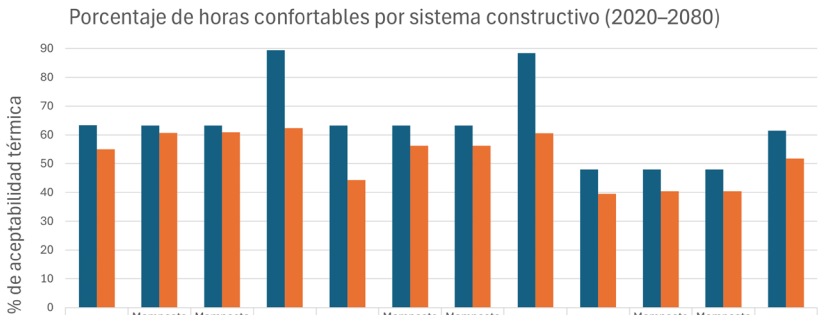
El estudio analizó dos apartamentos de 64 m² en un bloque multifamiliar de vivienda social ubicado en Santiago de Cali, clima tropical cálido seco (figura 2). El primero, en un piso intermedio con condiciones adiabáticas en piso y techo; el segundo, en el último nivel, con cubierta expuesta a ganancia térmica. La volumetría fue modelada conforme al Documento Técnico de Soporte (DTS) de la Resolución 0549 de 2015, que establece lineamientos para edificaciones en Colombia. La envolvente evaluada correspondía a la fachada con mayor exposición solar, con orientación oeste y lateral norte.

El prototipo consistió en una envolvente multicapa, un sistema de auto sombreado para tratar con la radiación solar directa, una capa con esferas de hidrogel para enfriamiento por convección, un aislamiento reflectivo en *foil* de aluminio y una base. Todo el elemento fue construido en PEtg, material de baja conductividad térmica. Esta solución se comparó con tres líneas base representativas (figura 3) en la vivienda social en altura en Colombia, según el censo de edificaciones: mampostería estructural (ME), mampostería confinada (MC) y sistemas industrializados (SI)[1]. Sus transmitancias térmicas fueron determinadas mediante el método de Çengel (2003), y en el caso del prototipo, a través del método de placa caliente adaptado de la investigación de Fonseca-Díaz y Tibaquirá-Giraldo (2008).

## Simulación energética y evaluación térmica

La evaluación térmica se realizó con Openstudio y EnergyPlus, empleando el modelo adaptativo de confort de de Dear y Brager (1998), adoptado por la norma

1 Ver censo de edificaciones en la página del Departamento Administrativo Nacional de Estadísticas (DANE), https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/construccion/censo-de-edificaciones.




| | Muro de concreto (SI) 2020 | Mampostería estructural (ME) 2020 | Mampostería confinada (MC) 2020 | Prototipo 2020 | Muro de concreto (SI) 2050 | Mampostería estructural (ME) 2050 | Mampostería confinada (MC) 2050 | Prototipo 2050 | Muro de concreto (SI) 2080 | Mampostería estructural (ME) 2080 | Mampostería confinada (MC) 2080 | Prototipo 2080 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Apto 301 (%) | 63,27 | 63,21 | 63,22 | 89,41 | 63,2 | 63,22 | 63,22 | 88,44 | 48,03 | 48,03 | 47,96 | 61,47 |
| Apto 501 (%) | 55 | 60,64 | 60,87 | 62,26 | 44,28 | 56,14 | 56,14 | 60,52 | 39,42 | 40,44 | 40,41 | 51,83 |

***Figura 4.*** *Información tomada como insumo, comportamiento bajo el modelo de confort adaptativo de las líneas base y de la envolvente propuesta para los años 2020, 2050 y 2080. Fuente: elaboración propia. (fuente: elaboración propia, 2025).*

ASHRAE 55. Se usaron datos climáticos históricos y proyectados (años 2020, 2050 y 2080) generados con la herramienta CCWorldWeatherGen que permite simular archivos climáticos futuros basados en escenarios de cambio climático (https://energy.soton.ac.uk/ccworldweathergen/). Se analizaron las horas anuales dentro y fuera del umbral de aceptabilidad del 80% (figura 4). Los resultados sirvieron de base para estimar los beneficios térmicos y su impacto sobre el consumo energético proyectado.

**Fase de análisis económico: evaluación costo-beneficio (ACB)**

Para evaluar la viabilidad económica del prototipo bioclimático en comparación con una solución convencional para viviendas de interés social, se desarrolló un análisis de costo-beneficio a largo plazo (ACB) para evaluar los impactos en el ahorro energético y la mejora del confort térmico. Este enfoque permite comparar los costos y beneficios de distintas alternativas a lo largo de diferentes horizontes temporales, utilizando criterios cuantitativos y proyecciones futuras. La relación beneficio/costo (B/C) se define como el cociente entre los beneficios netos actualizados y los costos totales actualizados, representada en la ecuación 1:

$$B/C = \Sigma(Bj/(1+i)^j)/\Sigma(Cj/(1+i)^j)$$

Donde:
Bj: beneficios en el período j.
Cj: costos en el período.
j: horizonte temporal evaluado.
i: tasa de descuento.
Un valor de B/C mayor a 1 indica viabilidad económica, mientras que un valor menor a 1 sugiere inviabilidad.

***Identificación de insumos***

Para implementar el ACB, se identificaron los siguientes insumos clave:

1. Costo inicial de implementación: calculado con base en el análisis de costos unitarios y el área de fachada del modelo analizado.
2. Tasa de descuento: se utilizó una tasa del 10%, siguiendo las recomendaciones de Campos y Serebrisky (2016) para proyectos en países en desarrollo. Este valor refleja una aproximación estándar, aunque podría variar según las condiciones económicas locales.
3. Ingresos proyectados: representados por la condición en la cual el porcentaje de insatisfechos era igual o inferior al 20%, según el modelo de confort adaptativo, lo que indicaba la presencia de ahorros.
4. Egresos proyectados: incluyen costos de energía, mantenimiento y factores relacionados con el porcentaje de usuarios insatisfechos térmicamente, considerando sus posibles fluctuaciones a lo largo del tiempo.

***Cálculo de flujos netos de efectivo***

Los flujos netos de efectivo se estimaron como la diferencia entre ingresos y egresos, actualizados mediante la ecuación 2 del Valor Presente Neto (VPN):

$$VPN = \sum(t=0)^n [Ft / (1+i)^t]$$

Donde:
∑(t=0) ^n: suma de todos los flujos de efectivo desde el período inicial (t=0) hasta el período final (t=n).
Ft: flujo de efectivo en el período t. Puede ser positivo (ingreso) o negativo (egreso).
(1+i) ^t: factor de descuento.
Este procedimiento permitió evaluar el impacto económico de cada alternativa en horizontes de 10, 20, 30 y 60 años, seleccionados en función de la vida útil promedio de una vivienda y los sistemas considerados.

**Modelado del consumo energético**

El consumo energético asociado a cada alternativa se modeló considerando la relación entre el porcentaje de usuarios insatisfechos térmicamente y el consumo eléctrico. Este último se calculó como el producto del consumo anual por equipo y el porcentaje de insatisfacción, empleando como referencia sistemas de aire acondicionado de 12.000 BTU. El consumo energético ajustado se estimó mediante la ecuación 3:

$$C_e = C_a * (1 - P_t)$$

Donde:
Ce: consumo energético ajustado (kWh/año)
Ca: consumo anual de referencia (kWh/año) para un sistema de 12.000 BTU
Pt: Porcentaje de usuarios satisfechos térmicamente (expresado como decimal, por ejemplo, 90% = 0,9)
Este modelo presenta algunas limitaciones, como la asunción de una relación lineal entre insatisfacción y consumo, que en la realidad podría ser más compleja. Además, factores como las condiciones climáticas,

la eficiencia del sistema y los hábitos de los usuarios también podrían influir en el consumo.

***Proyecciones y análisis complementario***

Para abordar la ausencia de datos en ciertos intervalos temporales, se aplicó una interpolación mediante tendencias gráficas generadas en Microsoft Excel. Esto permitió completar las proyecciones necesarias y garantizar la continuidad de los datos. La figura 5 ilustra la proyección del porcentaje de usuarios insatisfechos a lo largo del tiempo. Adicionalmente, los resultados del ACB se sintetizaron en tablas comparativas que destacan las ventajas y desventajas económicas de cada alternativa en relación con una línea base sin mejoras energéticas.

**Fase de análisis ambiental: ciclo de vida y huella de carbono**

En esta segunda fase, se utilizó la metodología de Análisis de Ciclo de Vida (ACV) para evaluar el impacto ambiental de seis alternativas constructivas de envolventes verticales para fachadas. El ACV permitió identificar y cuantificar las emisiones de gases de efecto invernadero asociadas a las fases de implementación y funcionamiento, expresadas en kilogramos de $CO_2$ equivalente ($kgCO_2e$). Esta metodología ofrece un marco replicable para comparar diferentes opciones de diseño considerando su impacto ambiental a lo largo de un horizonte temporal de 60 años. Para obtener una comprensión más completa de las limitaciones y ventajas de cada alternativa de cerramiento, se realizó un análisis de impacto ambiental mediante el ACV, según Rieznik y Hernández (2005). Este análisis tiene como objetivo valorar las cargas ambientales asociadas a un producto, proceso o actividad, identificando tanto el uso de materia y energía, como los impactos al entorno, permitiendo así identificar la opción de menor impacto.

Aunque un ACV posee múltiples enfoques, permite establecer objetivos de medición y separar los impactos. Rosillo y Herrera (2019) sostienen que una buena forma de medir los impactos se encuentra asociada a las toneladas de $CO_2$ producidas por las actividades y consumos incurridos. Por lo tanto, se consideró evaluar el aporte al calentamiento global en términos de kilogramos de $CO_2$ producidos por cada opción, aprovechando los datos obtenidos en el análisis costo-beneficio, como el consumo eléctrico.

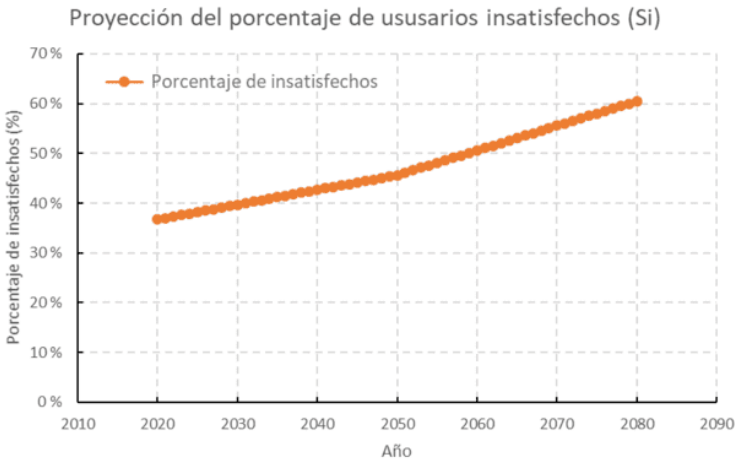



***Figura 5.*** *Proyección del porcentaje de usuarios insatisfechos a lo largo del tiempo de la envolvente propuesta (fuente: elaboración propia, 2025).*

El análisis incluyó las fases de implementación (extracción de materiales, manufactura y construcción) y funcionamiento (mantenimiento y renovación). Las etapas de disposición final no se consideraron en el presente estudio. Este enfoque fue limitado a la categoría de impacto del calentamiento global, permitiendo un análisis enfocado en las emisiones de $CO_2$ derivadas de los consumos energéticos y actividades de mantenimiento durante el período evaluado.

***Parámetros de confort térmico***

La unidad funcional definida consistió en garantizar un 80% de aceptabilidad en comodidad térmica, según el método adaptativo, para un apartamento de 64 $m^2$ ubicado en un clima tropical cálido seco. Este modelo, como lo señalan Giraldo C. et al. (2021) y Godoy-Muñoz (2012), consideran las condiciones climáticas locales y las interacciones de los usuarios, lo que genera ahorros significativos de energía en comparación con los enfoques estáticos. Esta definición asegura que los resultados sean consistentes y comparables entre las diferentes alternativas constructivas evaluadas.

***Recopilación de datos***

Los datos necesarios para llevar a cabo el ACV fueron recopilados a partir de:

- **Estudios previos de la fase de ACB:** información sobre el consumo eléctrico anual y acumulado, así como las emisiones asociadas a cada alternativa constructiva.
- **Factores de emisión:** se utilizó el factor de emisión del margen combinado para Colombia, estimado en 0,401 $kgCO_2/kWh$, según el Ministerio de Minas y Energía (Sánchez-Rippe *et al.*, 2020).
- **Parámetros de mantenimiento:** datos referentes a las actividades de mantenimiento, como repinte anual y renovación de componentes de cada línea base.

***Proceso de análisis***

El proceso metodológico consistió en los siguientes pasos:

***Cálculo de emisiones de $CO_2$ por consumo eléctrico:***

Las emisiones derivadas del consumo eléctrico anual y acumulado se calcularon utilizando la siguiente ecuación 4:

$$E_{CO2} = C_{el} \times F_{em}$$

Donde:

$E_{CO2}$: emisiones de $CO_2$ ($kgCO_2e$).

$C_{el}$: consumo eléctrico (kWh).

$F_{em}$: factor de emisión ($kgCO_2/kWh$).

Se recopiló la información necesaria sobre consumos y factores de emisión para cada alternativa, organizando los datos en tablas como parte del proceso de análisis.

***Estimación de emisiones por implementación y mantenimiento***

Se identificaron las fuentes de emisión asociadas a la fase de implementación y las actividades de mantenimiento, tales como repinte y renovación de equipos. Estas se incorporaron al cálculo total mediante la siguiente ecuación 5:

$$E_{total} = E_{impl} + (E_{anual} \times T) + E_{mant}$$

Donde:

$E_{impl}$: emisiones por implementación ($kgCO_2$).

$E_{anual}$: emisiones anuales por consumo eléctrico ($kgCO_2$).

$T$: horizonte temporal (60 años).

$E_{mant}$: emisiones acumuladas por mantenimiento ($kgCO_2e$).

***Estandarización de los cálculos***

Todos los datos se normalizaron con base en la unidad funcional establecida. El procesamiento se llevó a cabo mediante herramientas como hojas de cálculo electrónicas (Microsoft Excel y Google Sheets), asegurando consistencia en las fórmulas empleadas y en el manejo de las variables del estudio.

***Desglose de costos y consumos***

Como parte del análisis económico, se incorporaron estimaciones de costos energéticos y de mantenimiento utilizando la fórmula del valor presente neto (VPN).

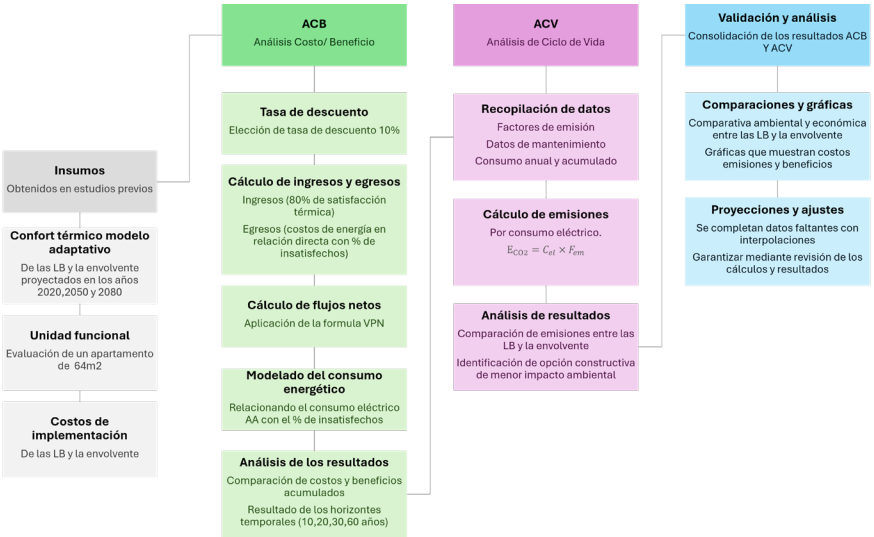



***Figura 6.*** *Mapa conceptual de la metodología de ACB y ACV combinados (fuente: elaboración propia, 2025).*

## VALIDACIÓN Y ANÁLISIS FINAL

En esta fase final, se consolidaron los resultados del Análisis Costo-Beneficio (ACB) y del Análisis de Ciclo de Vida (ACV) (figura 6) para proporcionar una perspectiva integral sobre el desempeño económico y ambiental del prototipo de envolvente bioclimática. Los datos obtenidos en las fases anteriores se sintetizaron en tablas y gráficas comparativas que mostraron las diferencias en costos energéticos acumulados, emisiones de $CO_2$ y beneficios económicos entre las alternativas evaluadas y el prototipo.

Se aplicaron herramientas de interpolación para completar datos faltantes y proyectar escenarios en distintos horizontes temporales. Asimismo, se verificó la correcta aplicación de factores de emisión (Sánchez-Rippe *et al.*, 2020) y parámetros de mantenimiento. Esta etapa aseguró la validez de los cálculos y consolidó un marco metodológico replicable y coherente para la evaluación de intervenciones bioclimáticas en climas tropicales.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El Análisis Costo-Beneficio (ACB) realizado evaluó la viabilidad económica de cada alternativa, comparando los índices obtenidos en la línea base con los del prototipo en un horizonte de 60 años, con intervalos de 10 años. Tal como se observa en la figura 7, el ACB del prototipo aplicado al apartamento 301 alcanza la factibilidad económica a partir de los cinco años, culminando con un índice ACB de 3,05 a los 60 años. Este valor indica que los ahorros energéticos generados superan en más del triple los costos iniciales de implementación del prototipo. Por otro lado, ninguna de las líneas base alcanzó índices de ahorro energético significativos debido a su dependencia de sistemas de climatización activa. Entre estas, los sistemas industrializados de concreto (SI) obtuvieron el mejor desempeño con un índice de -4,59, mientras que la mampostería estructural (ME) registró el menor desempeño con un índice de -10,74.

En contraste, los resultados para el apartamento 501, representados en la figura 8, muestran que el prototipo no logró alcanzar la factibilidad económica, obteniendo un índice de -3,93. En este caso, las líneas base, como la mampostería confinada (MC) y los sistemas industrializados en concreto (SI), mostraron desempeños similares, con un índice de -4,59,

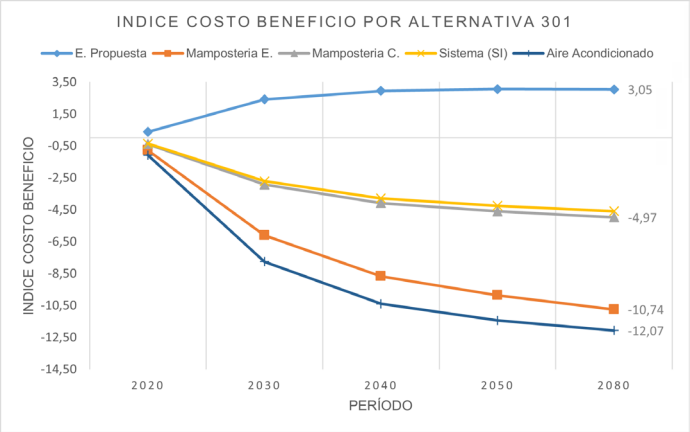



***Figura 7.*** *Análisis de Costo-Beneficio dados por alternativa en un período de 60 años, para el apartamento 301 (fuente: elaboración propia, 2025).*

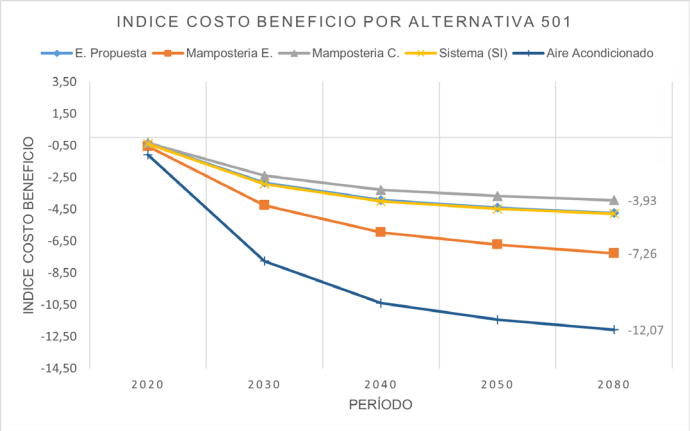



***Figura 8.*** *Análisis de Costo-Beneficio dados por alternativa en un período de 60 años para el apartamento 501 (fuente: elaboración propia, 2025).*

mientras que la mampostería estructural (ME) continuó siendo la menos eficiente con un índice de -7,26. Este comportamiento se atribuye a la importancia de la cubierta como principal captadora de energía térmica en pisos superiores, reduciendo la eficacia de las mejoras en la envolvente vertical tanto en confort térmico como en los índices ACB.

Los resultados obtenidos, representados en las figuras 7 y 8, muestran la relación entre las emisiones totales de $CO_2$ (en kilogramos) y los costos económicos derivados del consumo energético para cada alternativa evaluada. En particular, la figura 7 corresponde al análisis realizado para el apartamento 301, mientras que la figura 8 presenta los resultados para el apartamento 501.

El análisis comparativo de los resultados para el apartamento 301 (figura 9) revela una disminución significativa en los costos de consumo y mantenimiento del prototipo de envolvente en comparación con la línea base, alcanzando una reducción aproximada del 40%. En cuanto a las emisiones generadas durante un período de 60 años, se observa una reducción del 44%, siendo el $CO_2$ el principal componente de control en la quinta columna establecida.

En contraste, el apartamento 501 (figura 10), que incorpora una condición de cubierta, muestra una brecha menor en la reducción de emisiones y consumo energético entre el prototipo y las tres líneas base seleccionadas. En este caso, la reducción alcanza un 10% aproximadamente. Esta diferencia podría atribuirse a la mayor área de superficie expuesta al ambiente en la cubierta, la cual no fue tratada en el marco de esta investigación.

El análisis de ambas unidades revela una tendencia clara: el prototipo de envolvente estudiado no solo compite en costos operativos a largo plazo, sino que también demuestra ser una alternativa económicamente viable. Este hallazgo respalda la implementación de estrategias de climatización eficientes, que contribuyen a la reducción de emisiones de gases de efecto invernadero sin comprometer la economía.

## DISCUSIÓN

Los resultados obtenidos destacan la importancia del Análisis combinado de Costo-Beneficio (ACB) y Ciclo de Vida (ACV) como herramientas clave para evaluar la viabilidad económica y ambiental de tecnologías bioclimáticas. En este estudio, el ACB del prototipo demostró factibilidad económica en escenarios específicos, como en el apartamento 301, alcanzando un índice positivo a mediano plazo. Estos hallazgos son consistentes con investigaciones previas, como las de Alba-Gómez *et al.* (2021), quienes identificaron que las estrategias pasivas de climatización, cuando se analizan bajo un horizonte de largo plazo, pueden ser económicamente viables al reducir costos energéticos y mejorar el confort térmico.

El uso del ACV permitió cuantificar los beneficios ambientales del prototipo, especialmente en términos de reducción de emisiones de $CO_2$, un aspecto clave para la transición hacia edificaciones sostenibles. Estudios como los de Bodach y Hamhaber,

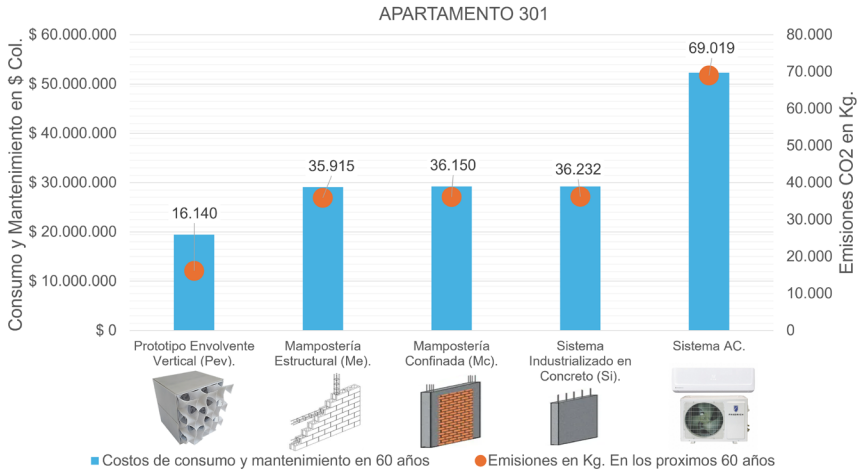



***Figura 9.*** *Totalidad de emisiones en kg de $CO_2$ de cada alternativa contra los gastos económicos derivados del consumo de energía eléctrica en pesos colombianos, para el apartamento 301 (fuente: elaboración propia, 2025).*

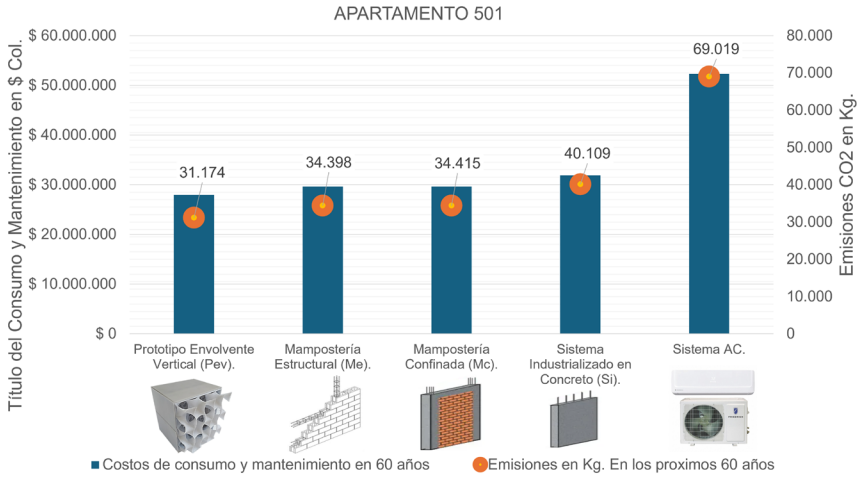



***Figura 10.*** *Totalidad de emisiones en kg de CO2 de cada alternativa contra los gastos económicos derivados del consumo de energía eléctrica en pesos colombianos. Para el apartamento 501. (fuente: elaboración propia, 2025).*

(2010) y Ramírez-Cuastuza y Alarcón-Rodríguez, (2024) subrayan la relevancia del ACV como marco para evaluar no solo las emisiones durante la operación de los edificios, sino también los impactos asociados a la producción y disposición final de los materiales.

No obstante, las limitaciones del prototipo observadas en el apartamento 501, donde el ACB fue negativo, enfatizan la necesidad de considerar factores como las propiedades térmicas de la cubierta, que influyen significativamente en el consumo energético en climas cálidos, ya que constituyen la mayor superficie de ganancia térmica. Asimismo, el modelo asumió una relación lineal entre insatisfacción térmica y consumo energético, lo cual simplifica el comportamiento real de los usuarios y las condiciones ambientales. Validaciones empíricas podrían mejorar la precisión de estos resultados.

Además, las condiciones climáticas analizadas, limitadas a un clima tropical cálido seco, restringen la aplicabilidad del prototipo. Sin embargo, la metodología aquí planteada es replicable en otros entornos si se ajustan variables como la radiación solar, la humedad y los materiales usados localmente. En conjunto, estos hallazgos reafirman el potencial combinado del ACB y ACV como marco integral de evaluación, y resaltan la necesidad de considerar los factores contextuales (ubicación, envolvente, exposición solar) al momento de tomar decisiones sobre estrategias bioclimáticas. En términos económicos, la tasa de descuento del 10% recomendada por Campos y Serebrisky (2016), aunque estándar para países en desarrollo, no considera posibles fluctuaciones económicas que podrían alterar los resultados.

## CONCLUSIÓN

Este estudio confirma que la integración del Análisis Costo-Beneficio (ACB) y el Análisis de Ciclo de Vida (ACV) constituye un enfoque metodológico sólido para evaluar la viabilidad económica y ambiental de estrategias bioclimáticas en viviendas sociales ubicadas en climas cálidos tropicales. La aplicación conjunta de ambos métodos al prototipo de envolvente vertical diseñado permitió cuantificar los impactos acumulados durante un horizonte de 60 años, evidenciando su potencial para optimizar el desempeño térmico y reducir la dependencia de sistemas mecánicos de climatización.

Los resultados obtenidos respaldan la rentabilidad económica del prototipo, al demostrar que, en escenarios como el apartamento 301, la inversión inicial puede recuperarse con creces en un período inferior a cinco años. Este hallazgo subraya la utilidad del ACB como herramienta de

apoyo en decisiones de diseño constructivo, especialmente en contextos de vivienda social con restricciones presupuestales.

Asimismo, el ACV permitió evidenciar una reducción significativa en las emisiones acumuladas de $CO_2$ respecto de alternativas convencionales, reforzando la necesidad de considerar el desempeño ambiental en todas las etapas del ciclo de vida del edificio. La inclusión de criterios cuantitativos ambientales y económicos en el proceso de diseño constituye un avance hacia modelos de edificación más sostenibles y resilientes frente al cambio climático.

Una contribución destacada de este trabajo radica en el desarrollo de un marco metodológico replicable, adaptable a diferentes estrategias pasivas y ajustable según variables locales como el costo de materiales o la matriz energética. Sin embargo, su aplicabilidad en otros contextos climáticos y constructivos requerirá adaptaciones específicas y validaciones empíricas que consideren factores como la orientación, la interacción con otras estrategias pasivas y el comportamiento real de los usuarios.

En este sentido, la metodología propuesta podría servir, previa validación y ajuste, como insumo técnico para la formulación de políticas públicas orientadas al fomento de la eficiencia energética en vivienda social. No obstante, su adopción requeriría esfuerzos adicionales de normalización, estandarización de insumos y verificación de resultados en escenarios reales.

Finalmente, esta investigación establece una base sólida para futuras evaluaciones integradas de estrategias bioclimáticas. La combinación de herramientas como el ACB y el ACV permite ampliar las capacidades de análisis y orientar el diseño arquitectónico hacia soluciones más coherentes con los desafíos sociales, económicos y ambientales actuales.

## REFERENCIAS


Alba-Gómez, L. K., Herrera-Sosa, L. C., y Esparza-López, C. J. (2021). Análisis de costo-beneficio de estrategias de climatización pasiva en vivienda social en Ciudad Juárez, Chihuahua. *Vivienda y Comunidades Sustentables*, *10*, 81–91. https://doi.org/10.32870/rvcs.v2i10.165.

Alegria-Lenis, H. F. (2022). *Envolvente vertical para la optimización del confort térmico en clima cálido*. https://hdl.handle.net/10893/24358.

Artaraz, M. (2002). Teoría de las tres dimensiones de desarrollo sostenible. *Ecosistemas 11(2)*. http//www.aeet.org/ecosistemas/022/informe1.htm.

Barrionuevo, A. S. (2019). Análisis de estrategias bioclimáticas aplicadas a edificaciones nZEB. *Revista Doctorado UMH*, *4*(2), 4. https://doi.org/10.21134/DOCTUMH.V4I2.1642.

Bodach, S., y Hamhaber, J. (2010). Energy efficiency in social housing: Opportunities and barriers from a case study in Brazil. *Energy Policy*, *38*(12), 7898–7910. https://doi.org/10.1016/J.ENPOL.2010.09.009.

Campos, J., y Serebrisky, T. (2016). Social discount rate and project evaluation. Some practical reflections for Latin America and the Caribbean. *Banco Interamericano de Desarrollo*. https://publications.iadb.org/publications/spanish/document/Tasa-de-descuento-social-y-evaluación-de-proyectos-algunas-reflexiones-prácticas-para-América-Latina-y-el-Caribe.pdf.

Çengel, Y. A. (2003). *Heat transfer: A practical approach*. McGraw-Hill Education.

Chen-Austin, M. A. (2022). Análisis de la influencia de la masa térmica en climas tropicales mediante simulación con Energy 2D. *Prisma Tecnológico*, *13*(1), 27–35. https://doi.org/10.33412/pri.v13.1.3262.

de Dear, R., y Brager, G. S. (1998). *Developing an adaptive model of thermal comfort and preference*. https://escholarship.org/uc/item/4qq2p9c6.

Fonseca-Díaz, N., y Tibaquirá Giraldo, J. (2008). Método para la estimación experimental de la conductividad térmica de algunos materiales comunes en Colombia para aplicaciones HVAC/R. *Scientia et Technica*, *2*(39), 464–469. https://doi.org/10.22517/23447214.3185.

Gamero-Salinas, J. C., Monge-Barrio, A., y Sánchez-Ostiz, A. (2020). Overheating risk assessment of different dwellings during the hottest season of a warm tropical climate. *Building and Environment*, *171*, 106664. https://doi.org/10.1016/J.BUILDENV.2020.106664.

Giraldo C., W. (2018). *Optimización del confort térmico en clima ecuatorial con tecnologías pasivas en fachada. Caso VIS Cali* [Universidad Nacional de La Plata]. https://doi.org/https://doi.org/10.35537/10915/68080.

Giraldo C., W., Czajkowski, D., y Gómez, A. (2021). Confort térmico en vivienda social multifamiliar de clima cálido en Colombia. *Revista de Arquitectura* . https://revistadearquitectura.ucatolica.edu.co/article/view/2938.

Godoy-Muñoz, A. (2012). *El confort térmico adaptativo: aplicación en la edificación en España* [Universidad Politécnica de Madrid]. https://doi.org/https://hdl.handle.net/2099.1/18763.

Guzmán-Hernández, I. A., Cano, F., y Roset, J. (2019). Problemática de los sistemas pasivos de climatización en zonas tropicales cálido-húmedas. *AULA Revista de Humanidades y Ciencias Sociales*, *64*(4). https://doi.org/10.33413/AULAHCS.2019.64I4.104.

Medina-Patrón, N., y Escobar-Saiz, J. (2018). Relación entre condiciones ambientales, espacios confortables y simulaciones digitales. *Revista de Arquitectura*. https://revistadearquitectura.ucatolica.edu.co/article/view/2140.

Paz, A. P. de, Tórres, R. P. R., Barranco, H. G., y García, E. G. (2023). Estrategias de eficiencia energética en un edificio privado en clima cálido subhúmedo. *Ciencia Nicolaita*, *87*. https://doi.org/10.35830/CN.V187.670.

Ramírez-Cuastuza, A. G., y Alarcón-Rodríguez, O. M. (2024). Evaluación de demanda energética y confort térmico en escenarios de cambio climático para vivienda tropical: caso de San Andrés y Providencia, Colombia. *AUS - Arquitectura / Urbanismo / Sustentabilidad*, *35*, 99–107. https://doi.org/10.4206/AUS.2024.N35-11.

Rieznik, N., y Hernández, A. (2005). *Elementos obligatorios y opcionales del AICV de acuerdo a la ISO ISO*. Biblioteca CF+S. http://habitat.aq.upm.es/temas/i4a-analisis-ciclo-vida.html.

Rodríguez-Potes, L., y Meza-Estrada, C. E. (2018). La construcción sostenible frente a la mitigación del cambio climático. *Módulo Arquitectura CUC*, *21*(1), 9–22. https://doi.org/10.17981/MODUCUC.21.1.2018.01.

Rosillo, M., y Herrera, C. (2019). *Confort y eficiencia energética en el diseño de edificaciones. Un enfoque práctico* (1st ed.). Universidad del Valle. https://doi.org/https://doi.org/10.25100/peu.163.

Sánchez-Rippe, J. D., Galvis-Mora, O. I., Dávila, P., G. O. J. C., Herrera-Flórez, H. H., y Gómez-Reyes, I. D. (2020). *Cálculo del factor de emisiones de la red de energía eléctrica en Colombia para 2020*. https://www1.upme.gov.co/ServicioCiudadano/Documents/Proyectos_normativos/Documento_Tecnico_FE_2020.pdf.

Torres-Quezada, J., y Lituma-Saetama, S. (2023). Estrategias de sostenibilidad enfocadas al confort térmico y la energía incorporada de una vivienda emergente en la Región Andina del Ecuador. *Revista Hábitat Sustentable*, *13*(1), 42–55. https://doi.org/10.22320/07190700.2023.13.01.04.